



Id.: EN08

EFEITO DE REDISTRIBUIÇÃO DE NÊUTRONS EM DETECTORES E EFEITO DE SOMBREAMENTO EM BARRAS DE CONTROLE DURANTE O EXPERIMENTO DE ROD-DROP NO REATOR IPEN-MB/01

Guilherme Elias Souza de Carvalho¹, Marcelo V. Silva¹, Thiago A. dos Santos², Daniel A. P. Palma³, Lucile Daniel Moreira, Anderson Patrício Resende e Giovanni Laranjo de Stefani¹

¹Universidade Federal do Rio de Janeiro (Av. Horácio Macedo 2030, Bloco G sala 206. Rio de Janeiro RJ Brasil)

²Universidade Federal da Grande Dourados (Rodovia Dourados/Itahum, Km 12, Cidade Universitária, Dourados/MS, Brasil)

³ Brazilian Nuclear Power Commission (Rua General Severiano, 90, Botafogo, Rio de Janeiro)

gcarvalho@nuclear.ufrj.br
mvilela@coppe.ufrj.br
thiagoasantos@ufgd.edu.br
lucile.ifrj@yahoo.com.br
andersonresende@poli.ufrj.br
dpalmaster@gmail.com
giovanni.laranjo@coppe.ufrj.br

Palavras-Chave: Rod Drop, IPEN/MB-01, Efeito Sombreamento

RESUMO

Este trabalho estuda a redistribuição do fluxo de nêutrons e o efeito de sombreamento em detectores usados na medição de reatividade integral das barras de controle pela técnica Rod Drop. Embora vantajosa por sua simplicidade e rapidez, a técnica apresenta grande imprecisão na medida da reatividade, causada pela redistribuição do fluxo de nêutrons, o chamado efeito de sombreamento. O objetivo é proporcionar um fator de correção para esse efeito. As simulações foram realizadas no reator IPEN/MB-01 utilizando o método Monte Carlo (MCNP6.2). Os resultados teóricos (0,50%) e experimentais (7,44%) mostraram boa concordância, permitindo corrigir o efeito de sombreamento e reatividade negativa.

1. INTRODUÇÃO

O reator IPEN/MB-01, classificado como potência zero, tem uma potência máxima de 100W e é usado para estudo de configurações de núcleos, reatividade e distribuição de potência. Com um fluxo de nêutrons elevado, mas baixa potência térmica, ele dispensa sistemas de remoção de calor, sendo resfriado pela circulação do moderador. Isso o torna ideal para estudos teóricos e experimentais [1]. O conjunto crítico IPEN/MB-01 é utilizado para analisar as propriedades dos nêutrons em sistemas que utilizam nível de água como moderador. Ele é empregado na validação de métodos de projeto para diversos tipos de elementos combustíveis e arranjos de redes do tipo PWR, além de avaliar a eficácia das barras de controle e a resposta a diferentes mudanças de reatividade [21].

Após uma recarga de combustível ou outras mudanças significativas no núcleo do reator, testes físicos em reatores nucleares são necessários para garantir que as características operacionais estejam em conformidade com suas especificações. Uma das fases mais importantes dos testes físicos de inicialização é obter experimentalmente a reatividade integral das barras de controle e das barras de segurança. As medidas obtidas nos testes são comparadas com as calculadas [2], que são consideradas como referências. Independentemente dos objetivos da operação, todos os reatores nucleares possuem, como parte de seus projetos, conjuntos de barras

de controle e segurança, cuja reatividade deve ser bem conhecida e, especialmente em reatores de potência, deve ser verificada por meio de medidas diretas [3].

Existem algumas técnicas de medidas da reatividade integral nas barras de controle já conceituadas na literatura, como: “teoria de difusão tridimensional” [21], “método de multiplicação da fonte de nêutrons” [4], o “método de oscilação da barra” [5], “Source Jerk” [6], [7], “diluição de boro” [8]. Existe também a técnica Rod Drop que possui algumas vantagens em relação a outras técnicas. A técnica Rod Drop se destaca por ser rápida e fácil de executar. Ela é realizada com o reator em estado crítico, soltando a barra de controle no núcleo para medir a reatividade. O fluxo de nêutrons é medido e usado na solução da cinética inversa. Devido à reatividade negativa subjacente, ocorre o "Efeito de Sombreamento", que altera a distribuição do fluxo de nêutrons e afeta a eficiência dos detectores, especialmente os mais próximos das barras [1].

Este trabalho propôs um método de correção para a redistribuição do fluxo de nêutrons, principal problema da técnica Rod Drop. Utilizou-se o núcleo 1 do reator IPEN/MB-01 na configuração 28x26, com simulações baseadas no método Monte Carlo (MCNP). A técnica Source Jerk também foi aplicada para obter e verificar o valor da reatividade.

2. METODOLOGIA

2.1 MODELAGEM COMPUTACIONAL

Todos os cálculos neutrônicos foram realizados no modelo tridimensional do reator do IPEN/MB-01 e escritos no código MCNP6.2 (Monte Carlo N-Particle) [22]. O MCNP É um programa tridimensional com propósito amplo, que funciona como uma ferramenta para levar partículas ao estado crítico, blindagem, dosimetria, detecção de resposta e diversas outras atribuições [9].

Para utilização do programa o usuário precisa criar inputs, onde, neles contém todas as informações relevantes para a simulação do núcleo do reator. Os dados resultantes são gerados através de arquivos de textos, os outputs [1]. Neste trabalho foi utilizado o MCNP em duas diferentes configurações: simulações com fontes e outro na simulação de criticalidade ou KCODE. A primeira é um dos quatro métodos disponíveis para definir partículas iniciais, já a segunda caracteriza a fonte de criticalidade, que é utilizada para gerar o Keff.

2.2 REATOR IPEN/MB-01

Abaixo está a Fig. 1, nos dar uma visão radial das varetas combustível. Todas as informações sobre o reator IPEN/MB-01 foram baseadas nas referências [10]; [11];[12].

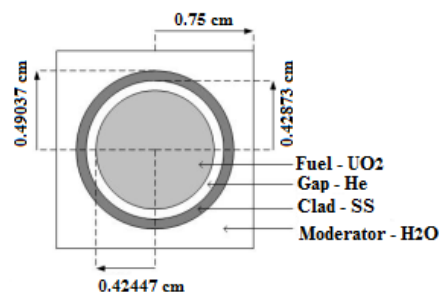


Fig. 1. Vareta de combustível (vista radial)

O reator está configurado em 28x26 varetas, onde A e B são as barras de controle e S as de segurança, conforme mostrado na Fig. 2.

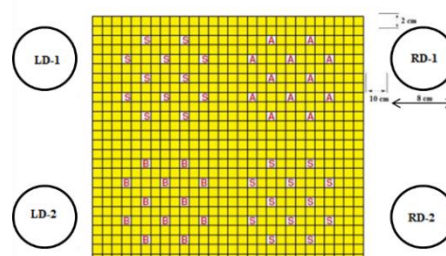




Fig. 2. Configuração 28 x 26 varetas.

Os detectores, com raio de 4 cm e comprimento de 54,8 cm, foram configurados para uma geometria controlada por água, semelhante à região contendo Urânio. O fluxo de nêutrons nessa geometria será estudado e simulará o sinal do detector. Diferenças entre os resultados em comparação ao experimento são previstas, devido às variações nas variações de choque entre o modelo e o experimento.

2.3 MÉTODO DE ROD-DROP

O método "rod drop" mede a reatividade nas barras de controle, realizando um SCRAM, ação de desligamento de emergência [20], em que o reator, operando a potência constante, tem barras de controle liberadas por gravidade. O fluxo de nêutrons é medido após o declínio dos modos mais altos, restando apenas o modo fundamental, em um intervalo de 10 a 60 segundos [1]. O método é aplicável a todos os tipos de reatores [13].

Esse método depende das seguintes premissas [14]: antes que as barras de controle caiam, os precursores de nêutrons retardados devem estar em equilíbrio, a equação cinética para os precursores de nêutrons retardados não depende do espaço, a fonte de multiplicação é dada por $M = 1/1 - k$, após a queda do conjunto de barras de controle, a geração de nêutrons retardados pode ser negligenciada e o detector apresenta a mesma população de nêutrons antes e imediatamente após a queda das barras de controle em um momento "t".

Um experimento no reator IPEN/MB-01 (configuração 28x26) testou o método de queda da barra. O SCRAM ocorreu com a queda do conjunto A de barras de controle, o fluxo de nêutrons foi medido por quatro detectores ao redor do núcleo e convertido em reatividade por um reatímetro [15].

2.4 SOURCE JERK

O método Source Jerk tem certos benefícios sobre outros métodos na medição de reatividade, ele é apoiado pela ideia da operação subcrítica do reator nuclear de estado estacionário [17]; [6].

A equação (1) é frequentemente utilizada para determinar a reatividade, sendo β a fração de nêutrons atrasados. Segundo Stefani [18], se um reator está em estado crítico e deixa cair as barras de controle por inteiro, para o IPEN-MB/01, a reatividade inserida será suficiente para cessar a atividade do reator, assim como parar o processo de fissão. Sendo um método experimental dependerá do quão sensível são os detectores, caso contrário não seria aplicável.

$$\rho = \beta \frac{n_1 - n_0}{n_1} \quad (1)$$

Apesar de não ser exatamente o nosso caso, o reator operando crítico pode ser considerando um problema de remoção de fonte, onde eliminamos a fonte dos nêutrons prontos. Assim, por essa analogia fizemos duas simulações para problemas de fonte no MCNP para a barra removida e inserida e a partir das medidas de fluxo obtidas na posição e volume correspondentes aos detectores do experimento determinamos a reatividade de forma numérica.

2.5 MÉTODO DO PERÍODO ASSINTÓTICO

O método mais comumente utilizado para a calibração das barras de controle é o do período assintótico. É qualificado pela ideia do reator no estado de potência crítica derrubando uma barra de controle, repetindo esse movimento até que todas estejam [19]. É utilizado para medições do período para estado quase supercrítico. Medindo o período do reator acompanhado de uma mudança na reatividade, podemos obter a reatividade pela equação Inhour.



Na equação 2, o período estável (T_p) do reator é o tempo necessário para a potência aumentada por um fator de $e = 2,7182$, e o tempo de duplicação corresponde ao aumento por um fator de 2. No experimento, o reator é levado a um estado supercrítico com a barra de controle B e, após removê-la parcialmente, o período é medido para determinar a reatividade. Em seguida, a barra de controle A é inserida para retornar o reator à criticidade. O método citado vai ser utilizado para validação da modelagem no MCNP, aprofundado na próxima seção.

$$\rho = \frac{\Lambda}{T_p} + \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i}{1 + T_p \lambda_i} \quad (2)$$

3. RESULTADOS

3.1 VALIDAÇÃO DA MODELAGEM DO MCNP

O modelo foi validado utilizando cinco medidas já conhecidas, são elas: excesso de reatividade na configuração 28x26, criticalização da configuração 28x26 do reator na configuração 1 (uma barra de controle 32% removida), configuração 2 (as duas barras 58% removidas) e experimento de medida da calibração da barra de controle [10]; [11]; [12].

Como o estudo envolverá a medição da reatividade integral da barra de controle. Comparamos as medições da reatividade integral da barra de controle realizadas através do método do período estável com a reatividade calculada utilizando o MCNP 6.2. No método MCNP, a reatividade é calculada comparativamente ao cenário da barra totalmente inserida, conforme ilustrado na Fig. 3.

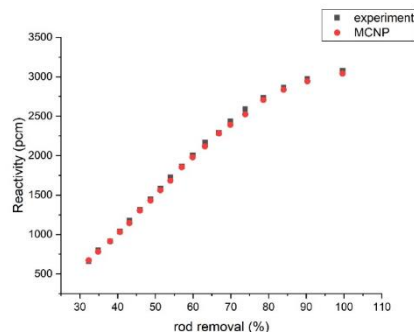


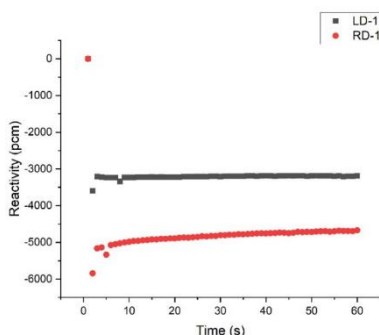
Fig. 3. Reatividade integral da barra de controle em função da sua posição

Analisando os dados apresentados na Tab. 1 e na Fig. 3 é possível observar que o modelo está em concordância com os cálculos do reator, o que nos permite exceder o seu uso na avaliação do experimento rod drop. A análise da fração efetiva de nêutrons atrasados é essencial, pois precisamos dela para aplicar a abordagem de salto rápido no cenário no caso do modelo rod drop.

3.2 EXPERIMENTO ROD DROP

A medida de reatividade utilizando a técnica de *rod-drop* consistiu em criticalizar o reator deixando a barra de controle B 32% removida e a barra de controle A 100% removida, em seguida deixar a barra de controle A cair com ação da gravidade.

O valor da reatividade foi medido com o auxílio do reatímetro, que faz leitura nos detectores que estão descritos na Fig. 2 a medida obtida pode ser vista a seguir nas Fig. 4 e 5:



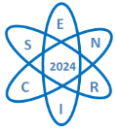


Fig. 4. Medida de reatividade utilizando o reatímetro medidos nos detectores RD-1 e LD-1.

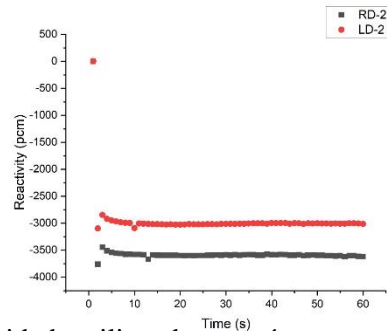


Fig. 5. Medida de reatividade utilizando o reatímetro medidos nos detectores RD-2 e LD-2.

Como Fig. 4 e 5 mostram que o transiente diminui rapidamente em cerca de 10 segundos, devido à meia-vida curta de 5 dos 6 conjuntos de precursor. Após esse tempo, a medição se estabiliza. No entanto, há uma discrepância nos valores conforme a posição do detector em relação à barra de controle A, causada pela redistribuição do fluxo de nêutrons, distorcida pela rápida introdução da barra absorvente. Isso afeta a proporcionalidade da dependência, dependendo da reflexão sobre a reatividade real do núcleo. Uma análise mais detalhada deve considerar esse efeito.

3.3 QUANTIFICANDO A REDISTRIBUIÇÃO DO FLUXO DE NÊUTRONS (FATOR DE FORMA)

Para garantir a precisão na reatividade das barras de controle, é essencial avaliar a redistribuição do fluxo de nêutrons no detector. A cinética pontual afirma que a mudança no fluxo do detector deve ser proporcional à mudança no fluxo do reator. Utilizaremos o método de *source jerk* para calcular a reatividade nos detectores. Ao mover a barra de controle, eliminamos o termo de fonte de nêutrons prontos, restando apenas os precursores de nêutrons atrasados.

No MCNP, simula-se com uma fonte de nêutrons de baixa intensidade no centro do reator, o que pode levar o sistema a atingir a criticidade mais cedo. A fonte permanece visível antes e após a inserção da barra de controle, sem afetar a reatividade negativa introduzida. Contudo, o MCNP não alcança convergência no estado supercrítico, exigindo extrapolação linear para obter o ponto inicial da simulação.

Adotando a relação entre a média do fluxo de nêutrons no combustível (φ_F) e a média no fluxo de nêutrons do detector (φ_D) na posição da barra de controle x temos:

$$f(x) = \frac{\varphi_D(x)}{\varphi_F(x)} \quad (3)$$

É esperado que $f(x)$ seja uma constante, mas, devido a redistribuição do fluxo esse valor irá alterar, então podemos quantificar o efeito de sombreamento $F(x)$ como uma razão entre o valor na posição x com relação ao valor na posição inicial $x = 0$:

$$F(x) = \frac{f(x)}{f(0)} \quad (4)$$

A partir disso, nas Fig. 6 e 7, temos a quantificação do fator forma.

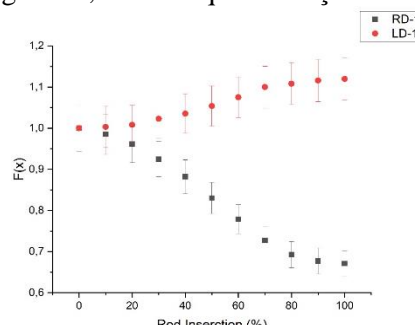


Fig. 6. Quantificação do fator de forma em função da inserção da barra de controle A para detectores RD-1 e LD-1.

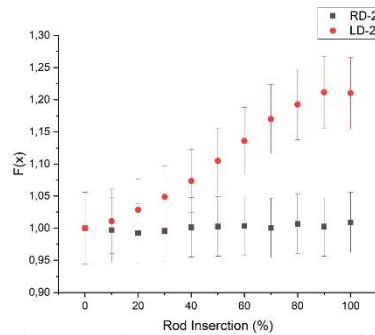


Fig. 7. Quantificação do fator de forma em função da inserção da barra de controle A para detectores RD-2 e LD-2.

3.4 CALIBRAÇÃO DA REATIVIDADE MEDIDA PELO DETECTOR

As Fig. 6 e 7 mostram os dados de reatividade nos detectores e permitem ajustes considerando o fator forma na medição da reatividade da barra de controle. Usando a técnica Source Jerk, é possível ajustar a reatividade com base nos dados de cada detector. O resultado do Source Jerk, que indica a reatividade da queda da barra de controle A, foi comparado com o valor gerado no experimento com o valor gerado no MCNP conforme a Tab. 1:

Tab. 1. Medida de reatividade nos detectores.

	Reatividade (pcm)	
	MCNP	Experimento
RD-2	-3968 ± 175	-3762 ± 107
LD-2	-3186 ± 145	-3097 ± 82
LD-1	-3504 ± 158	-3593 ± 136
RD-1	-6344 ± 263	-5845 ± 274
K-code	-4049 ± 4	-

A reatividade registrada pelo sensor foi menos afetada pelo sombreamento (RD-2) do que no experimento de período estável (3041 ± 5 pcm). O Kcode do software MCNP indicou uma reatividade negativa de 4049 ± 4 pcm, mostrando que, além da redistribuição de fluxo, outra barra de controle parcialmente inserida aumentou a reatividade negativa. No período estável, a compensação ocorre com a inserção de outra barra, o que não acontece na queda da barra. Quanto às preocupações de reatividade relacionadas à Tab. 4, realizados durante o transitório ($t < 10$ s), apresentam maior incerteza devido ao tempo e limitações. Assim, há necessidade de uma correção adicional em relação à barra introduzida. Podemos quantificar essas correções da seguinte forma:

$$\rho_c = \frac{n - n_0 f(100)}{n} \cdot \varepsilon \cdot \beta \quad (5)$$

Então:

$$\rho_c = f(100) \cdot \rho \cdot \varepsilon - (f(100) - 1) \cdot \varepsilon \cdot \beta \quad (6)$$

Onde ρ_c é o valor da reatividade corrigida, $f(100)$ o efeito de sombreamento para a barra 100% inserida, ε a razão entre o valor real da barra de controle e o valor sombreado pela presença de outra barra e ρ o valor medido. Os valores dessa correção são apresentados na Tab. 2:

Tab. 2. Reatividade corrigida.

	Reatividade corrigida			
	MCNP		Experimento	
	Reatividade (pcm)	$\Delta\rho$ (%)	Reatividade (pcm)	$\Delta\rho$ (%)



RD-2	-3030 ± 211	0.35	-2877 ± 194	6.40
LD-2	-3043 ± 211	0.06	-2727 ± 188	11.33
LD-1	-3036 ± 212	0.17	-2986 ± 218	2.87
RD-1	-3056 ± 213	0.50	-3163 ± 227	2.95

Na correção dos dados experimentais foram utilizados os valores do efeito de sombreamento e o efeito de redistribuição do fluxo de nêutrons nos detectores e barras de controle obtidos através do cálculo com o MCNP. Os valores obtidos apresentaram boa concordância com a correção proposta e desvios percentuais máximos de 0,50% teórico e 11,33% experimental.

4. CONCLUSÃO

A partir dos dados obtidos, verificou-se concordância entre os dados do MCNP e o experimento. Como demonstrado, as validações apresentaram uma diferença muito pequena de 1,11% para o excesso de reatividade, 12 pcm para a configuração 1 e 6 pcm para a configuração 2. Além disso, foi constatado um valor inferior a 1% para a fração de nêutrons retardados.

Apesar do código MCNP não incluir uma função para simular resultados transitórios, foi possível observar o efeito sombreamento com uma estimativa razoável do estado próximo à queda da barra de controle no experimento. A simulação com a função MCNP Kcode revela que a reatividade negativa introduzida por um único banco de controle é aumentada em cerca de 1000 pcm pela presença de outro banco parcialmente inserido. Portanto, é evidente que a calibração precisa levar em consideração tanto o efeito de sombreamento devido ao banco de controle parcialmente inserido quanto à redistribuição do fluxo de nêutrons. Analisando os dados da Tab. 1, verificamos que foi apropriado empregar o método Source Jerck para a comparação com o experimento realizado. Notamos que o detector que se destacou pela diferença na reatividade foi o RD-1, apresentando valores de -6344 ± 263 , enquanto os demais mantiveram uma média de reatividade semelhante e se aproximaram bastante do valor experimental.

Entretanto, na Tab. 2, onde os dados revisados já foram apresentados. Aplicamos a fórmula para ajustar os dados do MCNP e os dados experimentais, todos os dispositivos apresentaram uma excelente concordância. Em valores relativos de 0.50% teórico e 7.44% experimental, o que evidencia a efetividade do método de ajuste empregado. Além de corrigir o efeito sombreamento, também conseguimos corrigir o efeito do incremento da reatividade negativa, Kcode = -4049 ± 4 , que surgiu devido a presença de outra barra de controle.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a FAPERJ e CNPQ pelo apoio para realização desta pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CARVALHO, G. *et al*, Study of neutron flux redistribution and shadowing effect in rod worth measurements with the rod drop experiment. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2023.112672>, v. 415, p. 112672, 2023.
- [2] MAIORINO, J.R. *et al*, Feasibility to convert an advanced PWR from UO₂ to a mixed U/ThO₂ core – Part I: Parametric studies, 2017, Annals of Nuclear Energy 102, 47-55.
- [3] Kloosterman, J.L. *et al*, MEASUREMENT AND CALCULATION OF CONTROL ROD WORTHS IN MASURCA, 2002, PHYSOR, Seoul Korea, 7-10 October 2002
- [4] Endo, T. *et al*, Detected-neutron Multiplication factor measured by neutron source multiplication method, 2011, Annals of Nuclear Energy, vol. 38, pp. 2417-2427
- [5] A. Trkov, *et al*, Application of the rod insertion method for control rod Worth measurements in research reactors, Kerntechnik 60 5–6, 1995



- [6] Roy, T. et. al., 2016. Pulsed Neutron Source Measurements in the BRAHMMA Accelerator-Driven Subcritical System, Nuclear Science and Engineering 184, 584-590. <https://doi.org/10.13182/NSE16-81>
- [7] Ryves, T. B. and Scott, M. C., 1962. Subcritical reactivity measurement by a source jerk method, Journal of Nuclear Energy, vol. 16, 455-463. [https://doi.org/10.1016/03683230\(62\)90198-2](https://doi.org/10.1016/03683230(62)90198-2)
- [8] Holt, L. et. al., 2016. Investigation of feedback on neutron kinetics and thermal hydraulics from detailed online fuel behavior modeling during a boron dilution transient in a PWR with the two-way coupled code system DYN3D-TRANSURANUS, Nuclear Engineering and Design 297, 32-43. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2015.11.005>
- [9] T. Goorley, *et al* (2012), Visão geral inicial da versão MCNP6, tecnologia nuclear, 180 :3, 298315, DOI: 10.13182/NT11-135.
- [10] Santos, A. et. al, 2013. Validation of neutronic models and calculation systems by means of experimental results in the IPEN/MB-01 reactor. Annals of Nuclear Energy 60, 51-63. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2013.04.022>
- [11] Santos, A. et. al., 2008a. Reactor Physics Experiments in the IPEN/MB-01 Research Reactor Facility, March, Paris: Blair Briggs.
- [12] Santos, A. et. al, 2006. Isothermal Experiments of the IPEN/MB-01 Reactor, International Handbook of Evaluated Reactor Physics Benchmark Experiments, Light Water Moderated Reactor – LWR, NEA/NSC/DOC (2006), p. 58, 2006.
- [13] M. Maillot, *et al.* Analysis of the rod-drop experiments performed during the CABRI commissioning tests. RRFM2018, Mar 2018, Munich, Germany. ffcea-02339288f.
- [14] Buoni, F. B., EXPERIENCE WITH THE USE OF THE ROD-DROP METHOD OF ROD CALIBRATION AT THE ORR AND IITR, Oak Ridge National Laboratory, 1963
- [15] Moreira, J., Real time reactivity measurements ‘reatimetro’, 1986, Rio de Janeiro, RJ - Brasil.
- [16] Pinto, L. N., 2012. Reactivity Effects Experiments at IPEN/MB-01 Nuclear Reactor. Dissertação de Mestrado. Master’s thesis, IPEN/USP.
- [17] Lamarsh, J. R., Nuclear Reactor Theory, 1966, Don Mills, Ontario: Addison Wesley Publishing Company, INC.
- [18] Stefani, G. L., About the technique of Rod Drop in measures of rod worth in security and control rods of nuclear reactors, 2013, Master Thesis IPEN, São Paulo.
- [19] Son, N. A. *et al.* 2017. Control Rod Calibration and Worth Calculation for Optimized Power Reactor 1000 (OPR-1000) Using Core Simulator OPR1000. World Journal of Nuclear Science and Technology, 7, 15-23. <https://doi.org/10.4236/wjnst.2017.71002>
- [20] Canazio, *et al.* " Desligamento de Emergência e Intertravamento Operacional de Reatores Nucleares Realizados com Controladores Lógicos Programáveis.
- [21] Aldama D L. *et al.* Determination of control rod worth for research reactors. 1999. IAEA-SM-360/24P.
- [22] Christopher J W, MCNP USER’S MANUAL Code Version 6.2, 2017. Los Alamos National Security.